

07.2

## Параметрическое усиление излучения квантово-каскадного лазера на длине волны $4.6\ \mu\text{m}$ в нелинейном кристалле $\text{ZnGeP}_2$

© О.Б. Выскубенко<sup>1,2</sup>, С.Г. Гаранин<sup>1</sup>, Н.Г. Захаров<sup>1,2</sup>, К.В. Кусакина<sup>1,3</sup>, В.И. Лазаренко<sup>1,2</sup>, А. Мухин<sup>1</sup>, Г.С. Соколовский<sup>4</sup>, К.А. Туляков<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в городе Сарове, Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>4</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 июля 2023 г.

В окончательной редакции 21 сентября 2023 г.

Принято к публикации 21 сентября 2023 г.

Экспериментально продемонстрировано усиление излучения импульсного квантово-каскадного лазера с длиной волны генерации  $\sim 4.6\ \mu\text{m}$  за счет нелинейного преобразования в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$ . Пиковая мощность на выходе нелинейного кристалла составила 373 W при входной пиковой мощности квантово-каскадного лазера 0.4 W.

**Ключевые слова:** квантово-каскадный лазер, Ho:YAG-лазер, параметрическое нелинейное преобразование.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.21.56464.19686

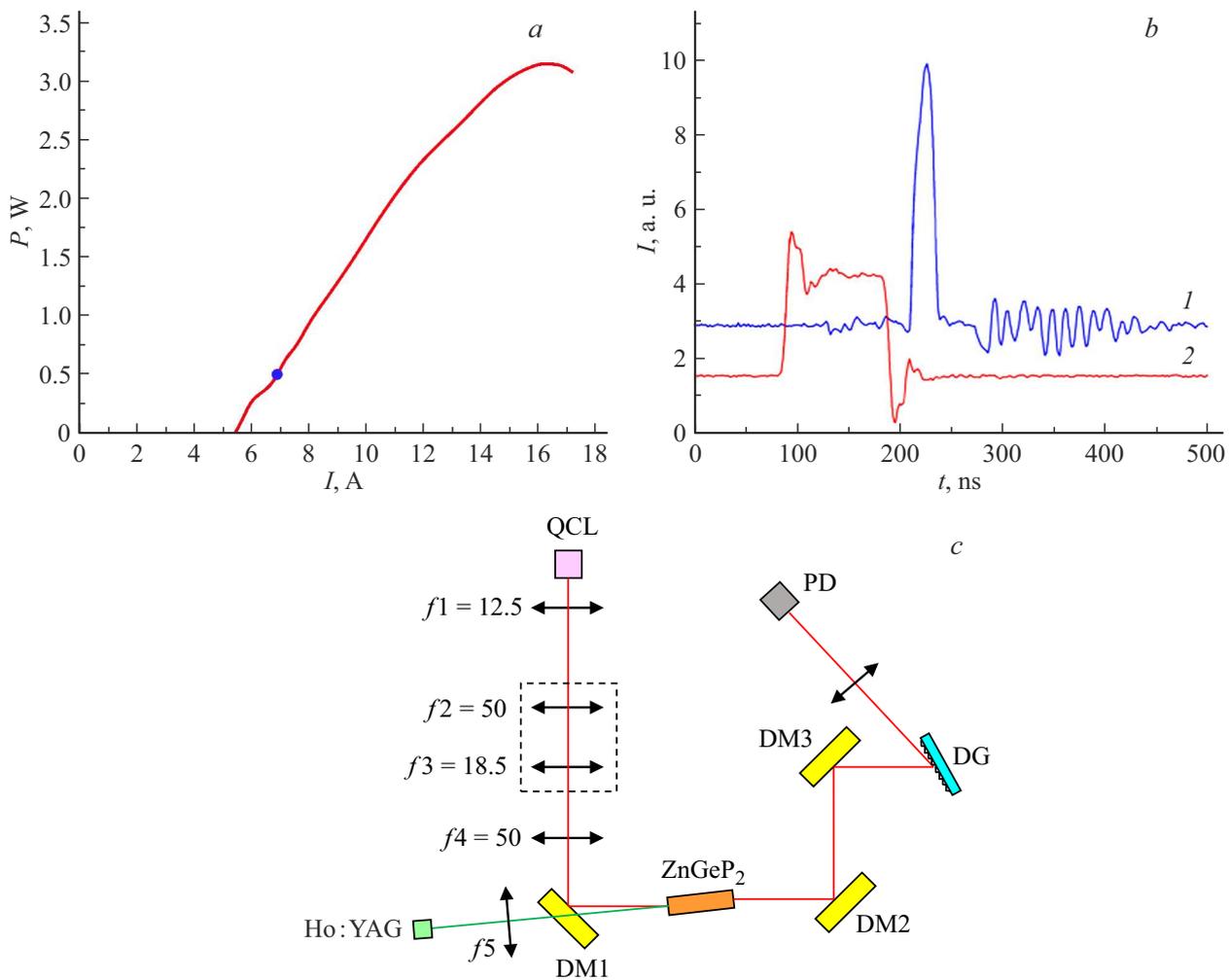
Одно из окон прозрачности атмосферы приходится на спектральную область  $4.5\text{--}5.2\ \mu\text{m}$ , что вызывает интерес к разработке лазеров, излучающих в этом диапазоне длин волн. Одним из таких источников излучения являются квантово-каскадные лазеры (ККЛ), которые благодаря своей униполярности и независимости от межзонных переходов способны излучать в среднем и дальнем ИК-диапазонах. Это делает их привлекательными для использования в экологическом мониторинге [1], неинвазивной медицинской диагностике [2], дистанционном зондировании [3] и построении беспроводных оптических систем связи [4].

Существенный прогресс в технологии создания ККЛ привел к значительному увеличению их выходной мощности. Так, сообщается о достижении на длине волны  $4.5\text{--}4.6\ \mu\text{m}$  выходной мощности свыше 10 W в импульсном режиме при комнатной температуре [5]. Тем не менее существуют труднопреодолимые ограничения на увеличение выходной мощности ККЛ. Латеральное увеличение выходной апертуры влечет за собой ухудшение качества пучка из-за многомодовой генерации, как правило не давая выигрыша в яркости. Увеличение количества каскадов в активной области приводит к увеличению рабочего напряжения и падению эффективности, а также к возникновению поперечных мод высшего порядка и ухудшению качества пучка. Увеличение тока накачки значительно выше порога генерации неизбежно приводит к росту падения напряжения на активной зоне ККЛ, что в свою очередь влечет за собой рассогласование лазерных и инжекционных

уровней квантовых каскадов и препятствует повышению выходной мощности.

В литературе представлено несколько способов увеличения выходной мощности систем ККЛ. В частности, интересна монолитная комбинация задающего генератора с усилителем в конфигурации MOPA (master oscillator power amplifier) [6,7], применяемая чаще всего для повышения мощности ККЛ с распределенной обратной связью, поддерживающих одночастотный режим генерации. Излучение массива синхронизованных по фазе ККЛ может давать пиковую мощность импульса в несколько десятков ватт [8,9]. Так, массив из ста ККЛ обеспечил генерацию с центральной длиной волны  $4.76\ \mu\text{m}$  и пиковую мощность в 40 W [8]. Сравнительно невысокая эффективность массива с трехзначным количеством элементов по сравнению с одиночным излучателем [5] в первую очередь определяется усложнением отвода тепла от чипа при повышении мощности. Кроме того, при сложении излучения отдельных элементов может возникнуть деструктивная интерференция, снижающая общую эффективность массива. Однако в работе [8] измерения дальнего поля подтвердили, что даже при больших токах накачки более 73.3% мощности излучения содержалось в центральном пятне, что является впечатляющим результатом.

Более простым с точки зрения технической реализации способом получения высокой мощности в импульсном режиме может быть параметрическое усиление излучения ККЛ. Так, в работе [10] сообщается о получении пиковой мощности в 580 W от ККЛ с распределенной обратной связью, генерирующего в непрерывном ре-



**Рис. 1.** *a* — ватт-амперная характеристика ККЛ. Точкой на кривой обозначена рабочая точка лазера. *b* — осциллограмма импульса излучения ККЛ (1) и импульса запускающего генератора (2). *c* — схема экспериментальной установки.

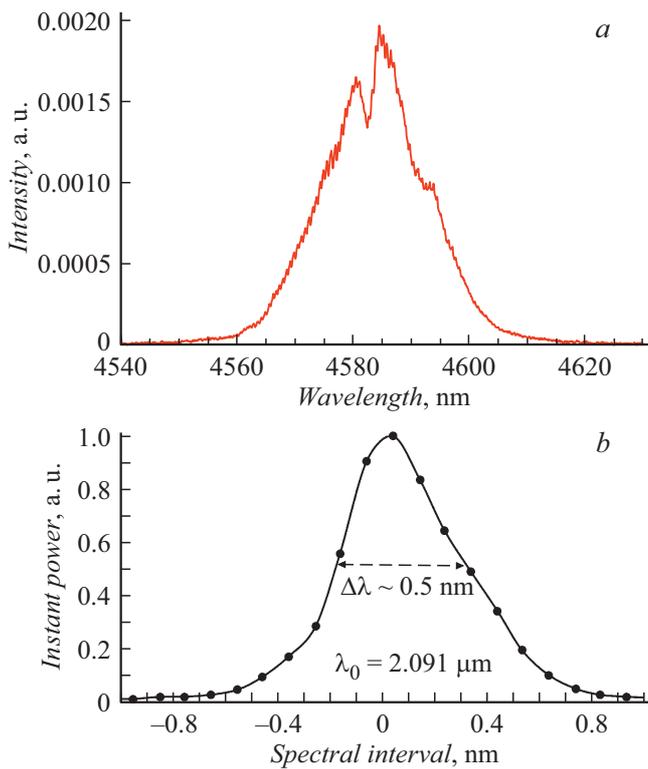
жиме 3 mW (усиление 53 dB) на длине волны  $4.5 \mu\text{m}$ . В качестве накачки использовался импульсный Ho:YAG-лазер, генерирующий импульсы длительностью 30 ns с частотой 20 kHz на длине волны  $2.09 \mu\text{m}$ . В качестве нелинейного кристалла использовался периодически поляризованный нелинейный элемент OP-GaAs длиной 41 mm. Кроме того, о параметрическом усилении излучения ККЛ в спектральном диапазоне  $8\text{--}10 \mu\text{m}$  сообщается в работах [11,12], где достигнуто максимальное усиление 20.5 dB (в 111 раз) и 26 dB соответственно.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов по усилению излучения ККЛ на длине волны  $\lambda \approx 4.6 \mu\text{m}$  с помощью параметрического преобразования в нелинейном кристалле ZnGeP<sub>2</sub>. Для параметрического преобразования были использованы квантово-каскадный лазер (усиливаемое излучение) и Ho:YAG-лазер накачки. Оба источника работали в импульсно-периодическом режиме с частотой 10 kHz, что потребовало решения задачи синхронизации усиливаемого импульса и накачки во времени. Использование нелиней-

ного кристалла ZnGeP<sub>2</sub>, в котором достигается фазовый синхронизм без периодической поляризации, обеспечило возможность усиления многомодового излучения широкополоскового ККЛ с резонатором Фабри–Перо с широким спектром генерации. Следует отметить, что нам не удалось найти в литературе другие работы, в которых сообщалось бы об усилении излучения ККЛ с длиной волны  $4.6 \mu\text{m}$  в нелинейном кристалле ZnGeP<sub>2</sub>.

ККЛ работал вблизи порога генерации (ток накачки ККЛ составлял 1.2 пороговых значения), мощность в импульсе излучения составляла около 0.5 W (рис. 1, *a*) при ширине импульса около 20 ns (см. осциллограмму на рис. 1, *b*). Ширина спектра излучения ККЛ составляла около 18 nm с центральным пиком вблизи 4585 nm (рис. 2, *a*).

Для накачки использовался Ho:YAG-лазер, излучающий на длине волны  $2.091 \mu\text{m}$  ( $\Delta\lambda \approx 0.5 \text{ nm}$ ) на основной моде устойчивого резонатора ( $M^2 \sim 1.1$ ), образованного плоским и сферическим зеркалами. Спектр его излучения приведен на рис. 2, *b*. Модуляция добротности



**Рис. 2.** *a* — спектр излучения ККЛ; *b* — спектр излучения Ho:YAG-лазера.

резонатора осуществлялась размещенным в нем акусто-оптическим модулятором, что позволяло генерировать импульсно-периодическое излучение. Длительность импульса лазера накачки составляла около 20 ns по высоте.

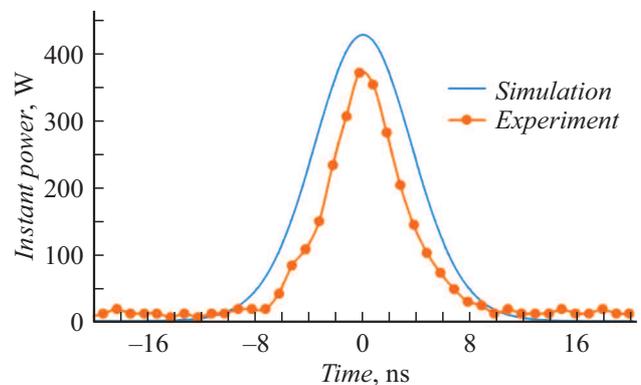
Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, *c*. Излучение ККЛ, имевшее большую угловую расходимость, собиралось в параллельный пучок линзой  $f_1$  и сужалось телескопической парой  $f_2-f_3$ , а затем фокусировалось линзой  $f_4$  на входную грань кристалла ZnGeP<sub>2</sub>. Кристалл имел размеры  $6 \times 6 \times 15$  mm. Его оптическая ось была ориентирована по отношению к направлению излучения накачки под углом  $\theta = 54.5^\circ$ . Главная плоскость кристалла ZnGeP<sub>2</sub> параллельна плоскости рисунка. Поляризация ККЛ соответствовала необыкновенному лучу. Излучение накачки от Ho:YAG-лазера соответствовало обыкновенному лучу и подавалось на входную грань кристалла сквозь дихроичное зеркало DM1, которое отражает излучение QCL на  $\lambda \approx 4.6 \mu\text{m}$  и пропускает излучение Ho:YAG-лазера на длине волны  $2.091 \mu\text{m}$ . Необходимая плотность мощности излучения накачки создается фокусировкой на входной грани кристалла с помощью линзы  $f_5$ . Подстройка фазового синхронизма осуществлялась поворотом кристалла в плоскости рисунка. После преобразования в кристалле выходной луч, имевший в составе несколько частотных компонент, отражался от двух дихроичных зеркал DM2 и DM3, чтобы отделить мощное излуче-

ние накачки на  $\lambda \approx 2.1 \mu\text{m}$  от относительно слабого излучения на  $\lambda \approx 4.6 \mu\text{m}$ . Для дополнительной селекции длины волны ККЛ луч подавался на дифракционную решетку DG, которая передавала фракцию  $\lambda \approx 4.6 \mu\text{m}$  на фотодетектор PD.

Длительность усиленного импульса излучения на  $\lambda \approx 4.6 \mu\text{m}$  составляла 6 ns. Уменьшение длительности усиленного импульса по сравнению с исходным импульсом ККЛ связано с тем, что его временной профиль определяется и исходным импульсом, и импульсом накачки. Следует учесть, что от последнего усиленный импульс зависит экспоненциально, так как усиление определяется накачкой. Это вызывает сужение временного профиля усиленного импульса как по сравнению с исходной формой импульса ККЛ, так и по сравнению с импульсом Ho:YAG-лазера накачки.

Средняя мощность импульса излучения длительностью 6 ns после дифракционной решетки составила 22.4 mW. При частоте следования импульсов 10 kHz это соответствует пиковой мощности 373 W. С учетом того, что пиковая мощность излучения ККЛ на входной грани нелинейного кристалла составляла 0.4 W, параметрическое усиление получилось близким к 30 dB (без учета потерь на линзах  $f_1-f_4$ ).

На рис. 3 приведены теоретические и экспериментальные временные зависимости мгновенной мощности импульса излучения ККЛ, усиленного в нелинейном кристалле ZnGeP<sub>2</sub>. Расчет параметрического усиления излучения проводился с помощью программного пакета SNLO [13]. Используемая нами функция этого программного пакета осуществляет численное решение системы связанных уравнений для амплитуд напряженностей в процессе трехволнового взаимодействия. В качестве входных данных используются как данные кристалла (показатели преломления и коэффициенты поглощения, углы сноса, коэффициент нелинейности, длина кристалла), так и данные об импульсах лазера накачки и ККЛ (энергии, длительности, диаметры пучков). Как видно из рисунка, теоретические и экспериментальные значения длительности импульса усиленного излу-



**Рис. 3.** Теоретические и экспериментальные зависимости от времени мгновенной мощности импульса излучения ККЛ, усиленного в нелинейном кристалле.

чения неплохо согласуются и составляют  $\sim 8.5$  и  $\sim 6$  ns соответственно. В то же время абсолютное значение пиковой мощности импульса излучения, полученного в результате расчетов, составляет около 425 W, что примерно на 15% превосходит экспериментальное значение. Эти несоответствия объясняются, на наш взгляд, многочисленными упрощениями, присущими теоретической модели, предполагающей, что импульсы накачки и усиливаемого излучения обладают гауссовыми распределениями и идеально совпадают друг с другом во времени и пространстве.

В связи с этим есть несколько возможностей для дальнейшего увеличения параметрического усиления. Во-первых, необходимо добиться более точного согласования во времени импульсов накачки с импульсами излучения ККЛ. Оба импульса имеют ширину около 20 ns. Из-за особенностей текущей конструкции Но:YAG-лазера накачки генерация импульсов накачки происходит с неопределенностью порядка 10 ns, в то время как квантово-каскадный лазер работает значительно стабильнее (джиттер импульса ККЛ составляет менее 1 ns). В результате в нелинейном преобразовании участвует не весь импульс ККЛ, а лишь та его часть, которая перекрывается импульсом накачки, что и приводит к потерям.

Во-вторых, можно увеличить долю энергии ККЛ, участвующую в преобразовании, за счет оптимизации системы фокусировки ККЛ в нелинейный кристалл. Но:YAG-лазер накачки генерирует пучок, близкий к гауссову, с величиной  $M^2 \approx 1.1$ . Такие параметры позволяют сфокусировать излучение накачки в пучок с перетяжкой 0.7 mm, слабо расходящийся на длине нелинейного кристалла 15 mm. Квантово-каскадный лазер по своей конструкции имеет большую расходимость, причем разную по двум осям. В настоящей работе для получения коллимированного пучка использовались плоско-сферические линзы, не позволяющие откорректировать эллиптическую форму сечения пучка ККЛ. Изначально большая расходимость ККЛ сохраняется при формировании перетяжки малого диаметра для сопряжения с излучением накачки в нелинейном кристалле, в результате лишь часть пучка ККЛ оказывается перекрытой и коллимирующей излучению накачки, что приводит к потерям. Для снижения этих потерь необходимо использовать цилиндрические линзы и более тщательно проектировать всю систему ввода излучения ККЛ в нелинейный кристалл в целом.

Также представляется возможным повысить выходную мощность преобразованного излучения, увеличив мощность излучения ККЛ. В настоящей работе для питания ККЛ использовался генератор тока, позволяющий работать лишь с небольшим превышением порога генерации ККЛ. Применение более мощного источника питания даст возможность значительно увеличить мощность излучения ККЛ, а следовательно, и мощность преобразованного излучения на выходе кристалла. Повышение

мощности накачки тоже приведет к увеличению мощности на выходе кристалла, однако плотность мощности излучения в кристалле при этом не должна превышать порог его разрушения.

Таким образом, в ходе экспериментов по усилению излучения квантово-каскадного лазера с длиной волны  $4.6 \mu\text{m}$  с помощью нелинейного преобразования в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$  пиковая мощность на выходе кристалла составила 373 W при коэффициенте усиления около 30 dB. Достигнутые результаты открывают перспективы для создания источника излучения с пиковой мощностью  $\sim 1$  kW, основанного на параметрическом усилении узкоспектрального излучения ККЛ, что позволит значительно увеличить рабочую дальность газоанализаторов и перспективных систем оптической связи.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке национального проекта „Наука и университеты“ (проект FSWR-2021-012) за счет субсидии федерального бюджета на финансовое обеспечение государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ. Создание и исследование характеристик ККЛ в ФТИ им. А.Ф. Иоффе выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-30020).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A. Kosterev, G. Wysocki, Y. Bakhirkin, S. So, R. Lewicki, M. Fraser, R.F. Curl, *Appl. Phys. B*, **90** (2), 165 (2007). DOI: 10.1007/s00340-007-2846-9
- [2] A. Schwaighofer, M. Brandstetter, B. Lendl, *Chem. Soc. Rev.*, **46** (19), 5903 (2017). DOI: 10.1039/c7cs00403f
- [3] P.Q. Liu, *Mid-infrared quantum cascade lasers with novel active core and laser cavity*, PhD thesis (Princeton, 2012).
- [4] X.Pang, O. Ozolins, L. Zhang, R. Schatz, A. Udalcovs, X. Yu, S. Lourduoss, *Phys. Status Solidi A*, **218** (3), 2000407 (2020). DOI: 10.1002/pssa.202000407
- [5] В.В. Дюделев, Д.А. Михайлов, А.В. Бабичев, Г.М. Савченко, С.Н. Лосев, Е.А. Когновицкая, А.В. Лютецкий, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, А.Г. Гладышев, Д.В. Денисов, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, В.И. Кучинский, А.Ю. Егоров, Г.С. Соколовский, *Квантовая электроника*, **50** (11), 989 (2020). [V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, A.V. Babichev, G.M. Savchenko, S.N. Losev, E.A. Kognovitskaya, A.V. Lyutetskii, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhitiin, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kuchinskii, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii, *Quantum Electron.*, **50** (11), 989 (2020). DOI: 10.1070/QEL17396].
- [6] B. Hinkov, M. Beck, E. Gini, J. Faist, *Opt. Express*, **21** (16), 19180 (2013). DOI: 10.1364/oe.21.019180

- [7] M. Bertrand, A. Shlykov, M. Shahmohamadi, M. Beck, S. Willitsch, J. Faist, *Photonics*, **9** (8), 589 (2022). DOI: 10.3390/photonics9080589
- [8] F.-L. Yan, J.-C. Zhang, Z.-Z. Jia, N. Zhuo, S.-Q. Zhai, S.-M. Liu, F.-Q. Liu, Z.-G. Wang, *AIP Adv.*, **6** (3), 035022 (2016). DOI: 10.1063/1.4945383
- [9] W. Zhou, D. Wu, Q.Y. Lu, S. Slivken, M. Razeghi, *Sci. Rep.*, **8**, 14866 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-33024-7
- [10] G. Bloom, A. Grisard, E. Lallier, C. Larat, M. Carras, X. Marcadet, *Opt. Lett.*, **35** (4), 505 (2010). DOI: 10.1364/ol.35.000505
- [11] Q. Clément, J.-M. Melkonian, J. Barrientos-Barria, J.-B. Dherbecourt, M. Raybaut, A. Godard, *Opt. Lett.*, **38** (20), 4046 (2013). DOI: 10.1364/ol.38.004046
- [12] F. Guppy, A. Grisard, C. Larat, D. Papillon, M. Schwarz, B. Gérard, R. Ostendorf, J. Wagner, E. Lallier, *Adv. Opt. Technol.*, **6** (2), 95 (2017). DOI: 10.1515/aot-2016-0062
- [13] <http://www.asphotonics.com/SNLO>